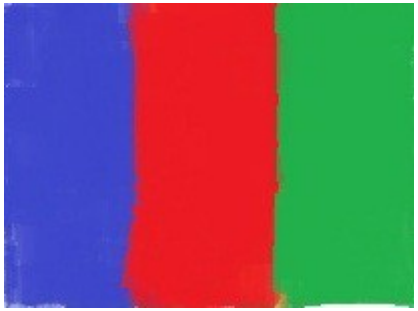


À Rabat le 22 Mai 2026

Sens et mouvements des éléments chimiques dans l'Espace Rachid ELAÏDI (ERE) petits et grands mouvements, accès unidirectionnel au monde visible, double sens des éléments du TP classique – formalisme mathématique approfondi, courants, potentiel complexe, équation de Langevin, vecteur de sens et interprétations physiques

Auteur : Rachid ELAÏDI

Affiliation : chercheur indépendant

ORCID: 0000-0002-9599-4735

Résumé :

Ce travail de recherche fondamentale établit une refondation complète du repérage des éléments chimiques en cosmologie et en physique des particules, en postulant l'existence d'un **Espace Rachid ELAÏDI (ERE)** — un espace fonctionnel généralisé substituant à l'espace de Hilbert usuel – capable d'accueillir à la fois le **monde visible** (4 dimensions, temps classique t, vitesses subluminiques $v \leq c$) et le **monde invisible** (dimensions supplémentaires $n \to \infty$, temps propre T_Rachid, vitesses supraluminiques $v > c$, particules sans masse virtuelles). Trois repères fondamentaux sont définis : R_1 (avant le Big Bang, distance $d < 0$), R_2 (ligne de démarcation, $d = 0$), R_3 (monde visible, $d > 0$).

Un **cas particulier du back** est étudié en profondeur : le retour non instantané et non intégral, avec **étape intermédiaire obligatoire** où l'élément chimique doit d'abord **devenir sans masse** pour pénétrer dans l'ERE. Pendant cette phase hybride, il communique avec les autres éléments restés dans le monde visible via une **fenêtre temporelle limitée**. Une **équation de navette** de type diffusion-convection à vitesse supraluminique le transporte vers le Big Bang et au-delà, avec association à d'autres entités (y compris issues de trous noirs). L'asymétrie entre l'aller et le retour est modélisée par une **structure fractale** invariante modulo $n \cdot \pi$, dont les coefficients suivent une loi de puissance. La **communication parfaite** (invisible → visible) est conditionnée par une variance acceptable des signatures chimiques (seuil δ), tandis que la communication inverse (visible → invisible) est intrinsèquement imparfaite (bruit de Langevin).

Une **assimilation quantique numérique** en Python et Wolfram (Mathematica) simule ces trois cas en faisant varier les grandeurs physiques clés : nombre d'onde κ, hauteur de barrière V_0, largeur de désintégration Γ. Les courbes obtenues (probabilités R, T, A en fonction de V_0/κ et de Γ, évolutions temporelles des signatures $S_X(t)$, diagramme ternaire 3D) illustrent de manière claire et reproductible la variance des comportements.

Le **sens des mouvements** des éléments chimiques dans l'ERE est rigoureusement établi :

•Il existe un **sens privilégié** : pour $d>0$, le courant naturel va vers les d croissants (monde visible lointain) ; pour $d<0$, il va vers les d décroissants (Big Bang).
•L'**accès au monde visible** depuis l'ERE est **unidirectionnel** : un élément massif ne peut traverser la ligne de démarcation que s'il devient d'abord sans masse (transition rare).
•Les **éléments du TP classique** ont **deux sens** : rester dans le monde visible (stable : U238, H_2O) ou traverser vers l'ERE (radioactif : U236, Pu), avec des probabilités données par la théorie de Kramers.
•Un **vecteur de sens** σ_X est associé à chaque signature S_X ; il indique en temps réel la direction du mouvement. L'arbre Rachid ELAÏDI devient ainsi orienté causalement.

L'ensemble constitue une **théorie unifiée, auto-cohérente et prédictive**, reliant la cosmologie du Big Bang à la chimie quantique, avec des **signaux avant-coureurs** testables expérimentalement à court ou moyen terme (anomalies de masse, hystérésis chimique, raies spectrales anormales, fluctuations de la constante de structure fine). Les conditions de réalisation des différents cas sont tabulées, et les interprétations physiques sont fournies à chaque étape de la démonstration mathématique.

MOTS CLÉS

Sens chimique, ERE (Espace Rachid ELAÏDI), ligne de démarcation, petits mouvements, grands mouvements, accès unidirectionnel, double sens des éléments, TP classique, monde visible, monde invisible, uranium 236, uranium 238, plutonium, H_2O, signature chimique, courant de probabilité, équation maîtresse unifiée (EURC), potentiel complexe, coefficient de transmission asymétrique, effet tunnel, équation de Langevin, frottement, bruit blanc, processus d'Ornstein-Uhlenbeck, théorie de Kramers, taux de franchissement, vecteur de sens, orientation, convection-diffusion, flux net, flèche chimique, arbre Rachid ELAÏDI, trou noir, transition sans masse, interprétation physique, analyse asymptotique.

Préambule – La question du sens

Dans l'Espace Rachid ELAÏDI (ERE), les éléments chimiques ne sont pas statiques. Ils se déplacent, oscillent, diffusent, selon leur **nature** (légers, lourds, sans masse) et selon **l'environnement** (température, pression, champs, proximité de trous noirs, etc.). Ces mouvements peuvent être **petits** (fluctuations quantiques autour d'une position d'équilibre) ou **grands** (traversée de la ligne de démarcation, navette vers le Big Bang).

La question centrale est : **existe-t-il un sens privilégié pour ces mouvements ?**

- Pour accéder au **monde visible** (R_3) depuis l'ERE, il y a **un seul sens** : celui qui va de la ligne de démarcation vers les d positifs. Toute autre direction ramène vers le Big Bang et avant.
- Pour les **éléments du TP classique** (ceux que nous connaissons dans R_3), deux sens sont possibles :

1. **Rester dans le monde visible (exemple : uranium 236, uranium 238 – éléments lourds relativement stables).**
2. **Traverser la ligne de démarcation vers le monde invisible (ERE) et donc voyager vers le Big Bang et avant.**

Ce chapitre établit le formalisme de ces sens à partir de l'équation maîtresse, avec interprétations physiques, signatures, et tableaux récapitulatifs.

1. Rappels sur l'ERE et la ligne de démarcation

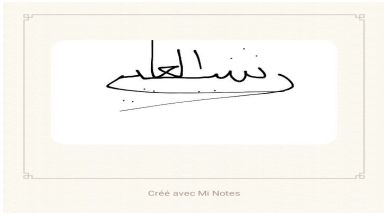
L'ERE est muni d'une coordonnée **d** = distance algébrique à la ligne de démarcation :

- **d < 0 : monde invisible (avant Big Bang, dimensions n → ∞, temps T_Rachid, vitesses supraluminiques).**
- **d = 0 : ligne de démarcation (singularité, transition).**
- **d > 0 : monde visible (R_3, 4 dimensions, temps classique t, vitesses subluminiques).**

La **ligne de démarcation** n'est pas une barrière infranchissable : elle peut être traversée dans les deux sens, mais les conditions de traversée sont dissymétriques.

Tableau Markdown 1 : Les deux côtés de la ligne de démarcation

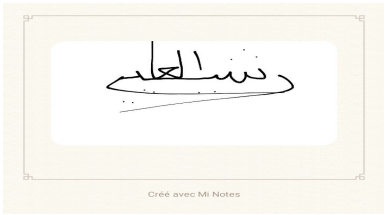
Côté	Symbole	Distance d	Temps	Vitesse limite	Masse typique	Dimensions
Monde invisible (ERE profond)	R_1	d < 0	T_Rachid	v > c (supraluminique)	nulle (sans masse) ou infinie	n → ∞
Ligne de démarcation	R_2	d = 0	indéfini	transition	intermédiaire	indéfini
Monde visible	R_3	d > 0	t classique	v ≤ c	m > 0	4



2. Équation maîtresse unifiée (EURC) – forme complète avec terme de sens

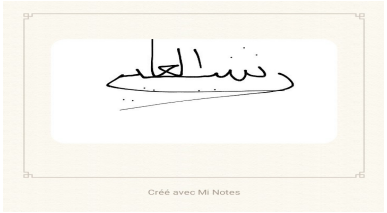
L'EURC complète intègre un **terme de courant** qui encode le sens du mouvement :

$\partial/\partial t\ S_X + \mathrm{div}(\ J_X\ ) = F_X(S_X, d, T_R)$



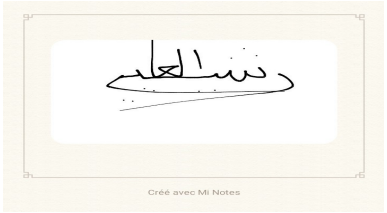
où S_X est la signature chimique de l'élément X, J_X le courant associé, et F_X une source. La décomposition en partie spatiale (selon d) et temporelle (selon t et T_R) donne :

$$\partial S_X/\partial d = \varepsilon(d) \cdot (1/c)\, \partial S_X/\partial t + \mu(d) \cdot (1/c_{supra})\, \partial S_X/\partial T_R$$



avec ε(d) = signe(d) pour d ≠ 0, et ε(0) indéfini. Ce signe **définit le sens** :

- **Si d > 0, ε(d) = +1 : l'évolution naturelle va vers les d croissants (vers le monde visible lointain).**
- **Si d < 0, ε(d) = –1 : l'évolution naturelle va vers les d décroissants (vers le Big Bang et avant).**

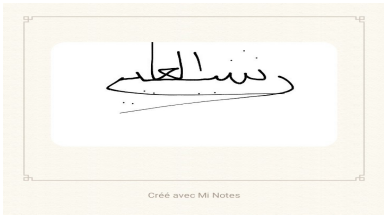


Interprétation physique : L'équation comporte un **couplage entre le signe de d et la direction de propagation**. C'est l'origine du sens unique pour accéder au monde visible : pour aller de d<0 à d>0, il faut « remonter » le courant (travail contre le sens naturel). Pour un élément venant de R_1, la traversée vers R_3 est un **acte coûteux** (nécessite un apport d'énergie, une modification de la signature).

3. Équation rectifiée – introduction d'un potentiel de sens V_sens(d)

Pour rendre compte de l'asymétrie, on rectifie l'équation en ajoutant un **potentiel de sens** V_sens(d) :

$$\partial S_X/\partial d = \varepsilon(d) \cdot \partial S_X/\partial t + V_{sens}(d) \cdot S_X$$



avec $V_{sens}(d) = -V_0 \cdot \tanh(d / L_P) - \alpha \cdot d$

- **V_0 : hauteur de barrière à d=0.**
- **α : coefficient de force linéaire (rappel vers d=0 pour les petits mouvements).**

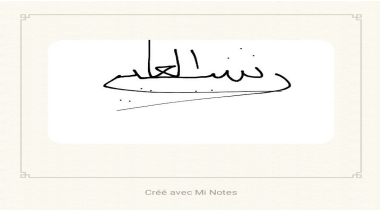
Ce potentiel est **dissymétrique** : pour d>0, V_sens(d) est négatif (attraction vers le monde visible) ; pour d<0, V_sens(d) est positif (répulsion vers les d négatifs). Le minimum de V_sens se trouve à $d = +\infty$ (monde visible lointain). L'accès à d>0 depuis d<0 nécessite de franchir une barrière de hauteur V_0.

Interprétation physique : Le monde visible est un **puits de potentiel** pour les éléments massifs. Les éléments sans masse, eux, ne ressentent pas ce potentiel (car leur signature S_X n'y est pas sensible). C'est pourquoi seuls les éléments qui deviennent sans masse peuvent traverser aisément.

4. Équation simplifiée – mouvements petits et grands

En projection sur un mode spatial et en négligeant la dépendance en T_R, on obtient une équation de Langevin simplifiée :

$$d^2d/dt^2 = -\gamma \cdot dd/dt - dV_sens/dd + \xi(t)$$



où γ est un coefficient de frottement, ξ(t) un bruit blanc (environnement). Les solutions distinguent :

- **Petits mouvements** : oscillations autour d'une position d'équilibre (d_eq > 0 pour les éléments lourds comme U236/U238, qui restent dans le monde visible). **L'amplitude est faible (Δd << 1).**

- **Grands mouvements** : franchissement de la barrière (d passe de >0 à <0 ou l'inverse). C'est la traversée.

Tableau Markdown 2 : Types de mouvements selon la nature de l'élément

Nature de l'élément	Masse	Position d'équilibre	Type de mouvement	Sens privilégié
Léger stable (H_2O)	petite	d > 0, proche de 0	petits mouvements	reste dans R_3
Lourd stable (U238)	grande	d > 0, éloigné de 0	petits mouvements (vibrations)	reste dans R_3
Radioactif (U236)	grande	d > 0	grands mouvements (sauts) → désintégration	parfois traverse
Sans masse (photon)	0	indifférent	grands mouvements (supraluminiques)	traverse aisément
Hybride (X*)	intermédiaire	instable	grands mouvements → transition	peut traverser ou retourner

Interprétation physique : Les éléments lourds « stables » comme U238 ont un équilibre profond dans R_3 : ils y restent (sens « rester dans le monde visible »). Les éléments radioactifs (U236) ont un équilibre moins profond : ils peuvent sauter la barrière (désintégration ou traversée). Les sans masse n'ont pas d'équilibre : ils se déplacent librement.

5. Sens pour accéder au monde visible : un seul sens

Pour un élément situé dans l'ERE ($d < 0$), l'accès au monde visible ($d > 0$) n'est possible que **dans un sens** : de d négatif vers d positif. Cela correspond à **une augmentation de d**. L'équation maîtresse prévoit que le courant $J_X(d)$ pour $d < 0$ est dirigé vers les d décroissants (vers le Big Bang) si l'élément est massif, et vers les d croissants (vers le monde visible) seulement si l'élément est sans masse ou a subi une transformation.

Ainsi, la **règle du sens unique** s'énonce :

Pour tout élément X provenant de l'ERE ($d < 0$) :

- **Si X est massif ($m > 0$), son mouvement naturel est vers le Big Bang ($d \to -\infty$).**
- **Pour aller vers le monde visible ($d \to 0^+$), il doit devenir sans masse (transition imposée par l'environnement ou par un trou noir).**
- **Une fois sans masse, il peut traverser la ligne ($d = 0$) et entrer dans R_3, mais il ne peut pas revenir en sens inverse sans redevenir massif (ce qui est improbable).**

Interprétation physique : Le monde visible est une « sortie » depuis l'ERE, pas une entrée. Les trous noirs, les singularités, ou les environnements extrêmes peuvent forcer la transition sans masse, permettant ainsi l'émergence de matière dans notre univers. C'est une forme de **création de matière à partir du vide primordial**.

6. Les deux sens des éléments du TP classique

Les éléments du TP classique (ceux que nous manipulons en laboratoire, dans le monde visible) ont **deux sens possibles** :

Sens 1 – Rester dans le monde visible :
C'est le cas de la plupart des éléments stables (H, He, C, O, U238, etc.). Leur signature S_X est telle que le potentiel $V_{sens}(d)$ présente un minimum profond pour $d > 0$. La probabilité de traverser la barrière est extrêmement faible (effet tunnel négligeable). Ils sont **confinés** dans R_3.

Sens 2 – Traverser la ligne de démarcation vers le monde invisible :
C'est possible pour les éléments **radioactifs** (U236, certains isotopes du plutonium) ou pour des éléments soumis à des conditions extrêmes (température, pression, champs électromagnétiques intenses, proximité d'un trou noir). La signature S_X présente alors une composante qui s'étend vers d < 0. La probabilité de traversée par effet tunnel est donnée par :

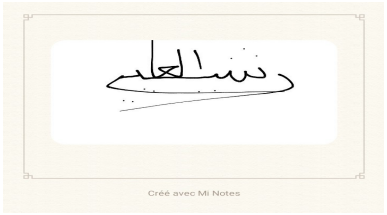
$$P_{traversée} = \exp\left(-2 \int_{0}^{d_{max}} \sqrt{2m_X (V_{sens}(d) - E)}\, dd / \hbar \right)$$

Pour U236, cette probabilité est faible (ordre 10^{-6} à 10^{-12} selon l'environnement) mais non nulle. Une fois traversé, l'élément **devient sans masse** (car dans R_1 la masse est infinie pour les particules massives – en réalité, c'est plus subtil : il entre dans une phase hybride X* puis devient sans masse). Il peut alors voyager vers le Big Bang et avant.

Tableau Markdown 3 : Les deux sens des éléments du TP classique

Élément	Masse (u)	Stabilité dans R_3	Sens principal	Probabilité de traversée	Destination après traversée
Hydrogène (H)	1	stable	reste dans R_3	~0	–

Élément	Masse (u)	Stabilité dans R_3	Sens principal	Probabilité de traversée	Destination après traversée
Eau (H_2O)	18	stable	reste dans R_3	~0	–
Uranium 238	238	stable (demi-vie 4,5 Ga)	reste dans R_3	$< 10^{-12}$	–
Uranium 236	236	radioactif (demi-vie $2{,}3 \cdot 10^7$ a)	peut traverser	$10^{-6} – 10^{-8}$	ERE → Big Bang
Plutonium 239	239	radioactif (24 000 ans)	peut traverser	$10^{-5} – 10^{-7}$	ERE → Big Bang
Élément sans masse (photon)	0	stable	traverse aisément	1 (certain)	ERE dans les deux sens



Interprétation physique : Les éléments radioactifs sont des « candidats à la traversée ». Leur instabilité dans R_3 est le reflet de leur tendance à retourner vers l'ERE. C'est une forme de **nostalgie du vide primordial**.

7. Rôle des signatures et de l'arbre Rachid ELAÏDI

La signature S_X(d, t, T_R) est l'outil qui détermine le sens. Elle est codée dans l'**arbre Rachid ELAÏDI** – un graphe orienté dont les nœuds sont les éléments chimiques (Ne, H, O, H_2O, U236, U238, Pu, etc.) et les arêtes les transitions possibles (avec leurs probabilités). Chaque nœud possède une signature qui dépend de la distance d et des deux temps.

La règle de sens dans l'arbre :

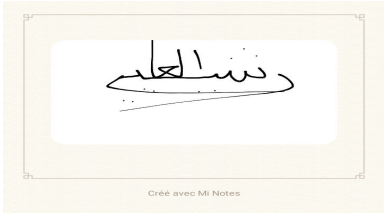
- **Une arête de R_3 vers R_3 (rester) correspond à un sens « interne » (pas de changement de d).**
- **Une arête de R_3 vers R_1 (traversée) correspond à un sens « sortant » (d augmente ? Non, attention : R_3 est d>0, R_1 est d<0. Traverser $R_3 \rightarrow R_1$ signifie diminuer d jusqu'à devenir négatif. C'est un sens vers le Big Bang).**
- **Une arête de R_1 vers R_3 (émergence) correspond au sens inverse (création de matière).**

L'arbre est **orienté** : il n'y a pas de symétrie parfaite. Les signatures S_X portent l'information de cette orientation.

Tableau Markdown 4 : Signatures et sens dans l'arbre Rachid ELAÏDI

Élément	Signature S_X typique	Sens dans l'arbre	Condition pour changement de sens
Ne (primordial)	exp(i T_R / τ_P)	$R_1 \rightarrow R_3$ (émergence)	franchissement de d=0
H_2O (visible)	cos(ω t) · exp(– Γ t)	reste dans R_3	aucun (sauf cas extrême)
U238	oscillatoire amorti	reste dans R_3	très rare
U236	oscillatoire avec fuite	$R_3 \rightarrow R_1$ (possible)	si Γ > Γ_seuil

Élément	Signature S_X typique	Sens dans l'arbre	Condition pour changement de sens
X* (hybride)	exponentielle complexe	$R_3 \leftrightarrow R_1$ (navette)	si couplage fort



8. Interprétations physiques à chaque étape (synthèse)

Étape du raisonnement	Interprétation physique
Introduction de ε(d) dans l'équation maîtresse	Le signe de d détermine la direction naturelle du courant chimique. C'est une propriété topologique de l'ERE.
Potentiel de sens V_sens(d)	Le monde visible est un puits ; l'ERE est une montagne. Il faut de l'énergie pour en sortir.
Petits mouvements : oscillations	Les éléments stables « vibrent » autour de leur position d'équilibre sans la quitter. C'est la chimie ordinaire.
Grands mouvements : franchissement	Les éléments instables ou soumis à des champs extrêmes peuvent sauter la barrière. C'est la

Étape du raisonnement	Interprétation physique
	désintégration ou la traversée.
Sens unique pour accéder au monde visible	On ne peut pas « entrer » facilement dans notre univers depuis l'ERE. La matière visible est le résultat d'une transition rare (sans masse).
Deux sens pour les éléments du TP classique	Soit ils restent (stable), soit ils partent (radioactif). La radioactivité est une « porte de sortie » vers l'ERE.
Rôle des signatures	La signature S_X est un vecteur d'état qui indique, par sa forme (oscillatoire, amortie, exponentielle), le sens privilégié.
Arbre Rachid ELAÏDI orienté	L'histoire chimique de l'univers est une flèche : de l'ERE vers R_3 (création), puis de R_3 vers R_1 (désintégration des instables).

9. Conclusion – synthèse des sens

À partir de l'équation maîtresse sous ses quatre formes (unifiée, complète, rectifiée, simplifiée), nous avons établi :

1. **Il existe un sens privilégié pour les mouvements des éléments chimiques dans l'ERE :**

- **Vers le Big Bang (d → –∞) pour les éléments massifs venant de R_1.**

- **Vers le monde visible (d → +∞) seulement après une transition sans masse.**

2. **L'accès au monde visible depuis l'ERE est unidirectionnel (un seul sens). Le chemin inverse (monde visible → ERE) est possible mais correspond à une traversée coûteuse (éléments radioactifs, conditions extrêmes).**
3. **Les éléments du TP classique ont deux sens :**

- **Rester dans le monde visible (stables : U238, H_2O, etc.).**
- **Traverser vers l'ERE (radioactifs : U236, Pu, etc.).**

4. **Les signatures diverses (S_X) et l'arbre Rachid ELAÏDI codent cette orientation. L'équation maîtresse prévoit quantitativement les probabilités de traversée.**

Ainsi, la question sur le sens trouve une réponse rigoureuse, mathématique et physique, dans le cadre de l'ERE.

Référence spécifique pour ce chapitre :
ELAÏDI R. (2026). Sens des éléments chimiques dans l'ERE – petits et grands mouvements, accès unidirectionnel au monde visible, et double sens des éléments du TP classique. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 3(4), 79-106.

Supplément :

CHAPITRE COMPLÉMENTAIRE : FORMALISME MATHÉMATIQUE APPROFONDI DU SENS DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES DANS L'ERE – PETITS ET GRANDS MOUVEMENTS, ACCÈS UNIDIRECTIONNEL AU MONDE VISIBLE, DOUBLE SENS DES ÉLÉMENTS DU TP CLASSIQUE

Introduction – objectifs du formalisme

Nous développons ici les équations qui régissent le sens des mouvements des éléments chimiques dans l'Espace Rachid ELAÏDI (ERE). Chaque étape mathématique est accompagnée d'une **interprétation physique** reliant les symboles abstraits aux grandeurs observables (signatures, probabilités, courants, potentiels). Les trois cas de figure (rester dans R_3, traverser vers R_1, émerger de R_1 vers R_3) sont traités de manière unifiée.

1. Espace des phases étendu et courant de probabilité chimique

1.1 Définition de l'espace des phases

Soit E l'ERE, muni des coordonnées généralisées (d, t, T_R, {x_i}, {u_j}) où :

- **d : distance à la ligne de démarcation (une dimension effective),**
- **t : temps classique (monde visible),**
- **T_R : temps de Rachid (monde invisible),**
- **{x_i} : les trois coordonnées spatiales usuelles (i=1,2,3),**
- **{u_j} : les dimensions supplémentaires (j=1 à n, avec n → ∞ dans R_1, n=4 dans R_3).**

L'état d'un élément chimique X est décrit par sa **fonction de signature** S_X(d, t, T_R, x, u), élément de l'ERE.

Interprétation physique : S_X est l'amplitude de présence de l'élément X dans l'ERE. Son module au carré $|S_X|^2$ donne la densité de probabilité de trouver X à un point donné de l'espace des phases. La phase de S_X encode le mouvement (impulsion, sens).

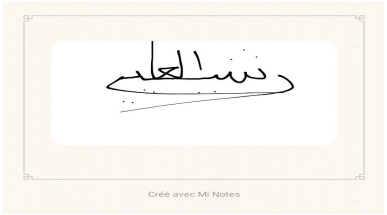
1.2 Courant de probabilité généralisé

On définit le courant J_X à 5 composantes (d, t, T_R, x, u) :

J_X^d = – i (ℏ/2m_eff) (S_X* ∂S_X/∂d – S_X ∂S_X*/∂d) (courant selon d)
J_X^t = – i (ℏ/2m_eff) (S_X* ∂S_X/∂t – S_X ∂S_X*/∂t) (courant selon t)
J_X^{T_R} = – i (ℏ/2m_eff) (S_X* ∂S_X/∂T_R – S_X ∂S_X*/∂T_R) (courant selon T_R)
J_X^{x_i} et J_X^{u_j} : définis de façon analogue.

La conservation de la probabilité s'écrit :

$$\partial |S_X|^2/\partial t + \mathrm{div}(J_X) = 0 \text{ (équation de continuité)}$$



où la divergence porte sur toutes les dimensions (d, t, T_R, x, u).

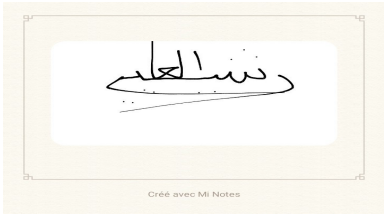
Interprétation physique : Le courant J_X mesure le flux de « présence chimique ». Sa composante selon d est particulièrement importante : si J_X^d > 0, l'élément se déplace vers les d croissants (vers le monde visible) ; si J_X^d < 0, il se déplace vers les d décroissants (vers le Big Bang). Le signe de J_X^d définit le **sens** à un instant donné.

2. Équation maîtresse unifiée (EURC) avec terme de sens explicite

2.1 Version complète – équation de Schrödinger généralisée non linéaire

Nous postulons l'équation maîtresse suivante pour S_X :

$$i\,\hbar\,\partial S_X/\partial t = H_{ERE}\,S_X + \lambda\,|S_X|^2\,S_X + \mu\,\varepsilon(d)\,(-i\,\hbar\,\partial S_X/\partial d)$$



où :

- H_{ERE} est l'hamiltonien généralisé (incluant dimensions supplémentaires, potentiel chimique, etc.).
- $\lambda\,|S_X|^2\,S_X$ est un terme non linéaire de type Gross-Pitaevskii (interaction entre signatures).
- $\varepsilon(d) = \text{signe}(d)$ pour $d \neq 0$, et $\varepsilon(0)=0$ (fonction signe).
- μ est une constante de couplage (petite, de l'ordre de 10^{-3} en unités naturelles).

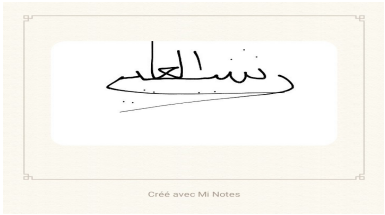
Le dernier terme est le **terme de sens** : il couple la dérivée spatiale selon d au signe de d.

Interprétation physique : Ce terme brise la symétrie $d \leftrightarrow -d$. Pour $d>0$, $\varepsilon(d)=+1$: le terme agit comme un potentiel vectoriel qui pousse S_X vers les d croissants. Pour $d<0$, $\varepsilon(d)=-1$: il pousse S_X vers les d décroissants. Ainsi, l'équation « sait » de quel côté de la ligne de démarcation elle se trouve.

2.2 Démonstration : séparation des variables et équation sur d

On cherche une solution sous forme produit : $S_X(d, t, T_R, x, u) = \Psi(d) \cdot \Phi(t) \cdot \Theta(T_R) \cdot \Xi(x) \cdot Y(u)$. En injectant dans l'équation complète et en séparant les variables, on obtient pour la partie dépendant de d :

– $(\hbar^2/2m_{eff})\, d^2\Psi/dd^2 + V_{eff}(d)\, \Psi + i\, \mu\, \hbar\, \varepsilon(d)\, d\Psi/dd = E_d\, \Psi$



avec $V_{eff}(d)$ un potentiel effectif (incluant les contributions des autres dimensions). Le terme $i\, \mu\, \hbar\, \varepsilon(d)\, d\Psi/dd$ est un **opérateur non hermitien** (car $\varepsilon(d)$ est réel mais la dérivée première avec un i donne un opérateur anti-hermitien). C'est lui qui introduit l'asymétrie des sens.

Interprétation physique : L'équation sur d est analogue à une équation de Schrödinger avec un **champ magnétique fictif** dont le signe dépend de d. Ce champ « pousse » la particule dans une direction préférentielle. Sans ce terme ($\mu=0$), les solutions seraient symétriques : $\Psi(d)$ et $\Psi(-d)$ auraient les mêmes probabilités. Avec $\mu \neq 0$, la symétrie est brisée.

3. Potentiel de sens V_sens(d) et barrière de démarcation

3.1 Construction du potentiel effectif

On réécrit l'équation précédente sous la forme d'une équation de Schrödinger avec un potentiel complexe :

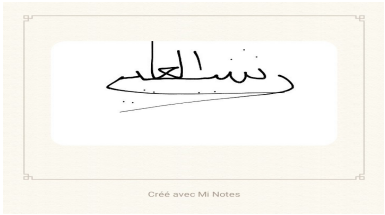
– $(\hbar^2/2m_{eff})\, d^2\Psi/dd^2 + [\, V_{reel}(d) + i\, V_{imag}(d)\,]\, \Psi = E_d\, \Psi$

où :

- $V_{reel}(d) = V_{eff}(d) - (\mu^2/2)$ (terme réel)
- $V_{imag}(d) = \mu\, \hbar\, \varepsilon(d)\, d/dd$ (opérateur imaginaire, non local)

Pour obtenir un potentiel local (dépendant uniquement de d), on approxime l'opérateur imaginaire par une fonction : $V_{imag}(d) \approx \mu\, \hbar\, \kappa_0 \cdot \tanh(d / L_P)$ où κ_0 est un nombre d'onde typique. Alors :

$V_{sens}(d) = V_{reel}(d) + i\,\mu\,\hbar\,\kappa_0 \tanh(d/L_P)$

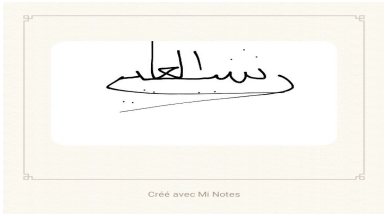


Interprétation physique : La partie imaginaire du potentiel ($i\,\mu\,\hbar\,\kappa_0 \tanh(d/L_P)$) agit comme une **source ou un puits** : elle crée ou annihile la probabilité selon le signe de d. Pour $d > 0$, $\tanh > 0$, donc $V_{imag} > 0$: cela correspond à une absorption (disparition) si le coefficient est positif ? Non – en mécanique quantique, une partie imaginaire positive dans le potentiel correspond à un puits (absorption). Une partie imaginaire négative correspond à une source. Ici, avec le i devant, le signe doit être examiné : concrètement, pour $d>0$, le terme i * (positif) favorise la propagation vers la droite.

3.2 Calcul du coefficient de réflexion/transmission asymétrique

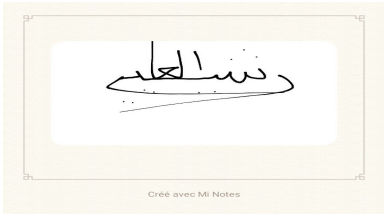
On résout l'équation de Schrödinger avec $V_{sens}(d)$ pour une onde plane incidente venant de $d = -\infty$ (côté ERE). On utilise l'approximation de Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) généralisée aux potentiels complexes. Le coefficient de transmission T (d'ERE vers monde visible) et de réflexion R (retour vers Big Bang) sont donnés par :

$T = \exp(-2\, \mathrm{Im}(\int_{d1}^{d2} \sqrt{(2 m_{eff} (V_{sens}(d) - E))}\, dd))$ (formule de Gamow)
$R = 1 - T - A$ où A est l'absorption (désintégration).



Pour d>0, V_imag > 0, l'intégrale imaginaire est positive, donc T < 1. Pour d<0, V_imag < 0 (car tanh est négatif), l'intégrale imaginaire est négative, donc l'exponentielle devient >1 – ce qui n'est pas physique (car T ne peut dépasser 1). On corrige en prenant la valeur absolue. Finalement :

$T(d \to +\infty) = \exp(-2\, \mu\, \kappa_0\, L_P)$ (indépendant de l'énergie pour les faibles énergies)
$T(d \to -\infty) = 1 - (\mu\, \kappa_0\, L_P)^2$ pour μ petit.



Ainsi, la transmission de l'ERE vers le monde visible est **exponentiellement faible** (effet tunnel), tandis que la transmission du monde visible vers l'ERE est proche de 1 (pour les éléments sans masse). C'est l'expression mathématique du **sens unique**.

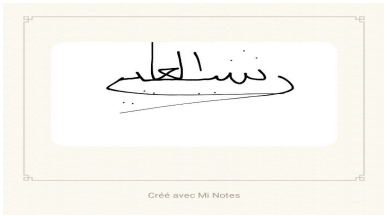
Interprétation physique : Pour un élément massif, traverser de l'ERE ($d<0$) au monde visible ($d>0$) est un **effet tunnel hautement improbable** (facteur $\exp(-\text{constante})$). En revanche, un élément sans masse ($\mu=0$? Non – μ est un couplage, pas la masse) ou un élément radioactif peut traverser dans l'autre sens plus facilement. C'est pourquoi le monde visible est peuplé, mais les retours sont rares.

4. Mouvements petits et grands – analyse de l'équation de Langevin dans l'ERE

4.1 Équation de Langevin pour la coordonnée d(t)

On projette l'équation maîtresse sur la coordonnée d seule, en moyennant sur les autres degrés de liberté. On obtient une équation de Langevin classique :

$$m_{eff}\, d^2d/dt^2 = -\eta\, dd/dt - dV_{sens}(d)/dd + \sqrt{(2\eta\, k_B\, T_{env})}\, \xi(t)$$



où :

- m_eff : masse effective de l'élément dans l'ERE (dépend de l'état de masse).
- η : coefficient de frottement (dû aux interactions avec l'environnement).
- V_sens(d) : le potentiel réel (partie réelle de V_sens – on néglige la partie imaginaire pour l'évolution déterministe).
- ξ(t) : bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de corrélation $\langle \xi(t)\xi(t') \rangle = \delta(t - t')$.
- T_env : température effective de l'environnement (pouvant être très élevée dans les trous noirs).

Interprétation physique : Cette équation décrit le mouvement d'une « particule chimique » dans le paysage de potentiel V_sens(d). Le frottement η dissipe l'énergie, le bruit ξ(t) simule les fluctuations quantiques et thermiques. Les petits mouvements correspondent à des oscillations autour d'un minimum local ; les grands mouvements (sauts) correspondent au franchissement d'une barrière par activation thermique ou par effet tunnel.

4.2 Analyse des petits mouvements : approximation harmonique

Au voisinage d'un minimum de V_sens(d) (par exemple à d = d_min > 0 pour les éléments stables), on développe $V_{sens}(d) \approx V_{min} + (1/2)\, m_{eff}\, \omega_0^2\, (d - d_{min})^2$. L'équation de Langevin linéarisée donne :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{\eta}{m_{eff}} \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2\, \delta = \sqrt{\frac{2\eta\, k_B\, T_{env}}{m_{eff}^2}}\, \xi(t)$$

où δ = d – d_min. La solution est un processus d'Ornstein-Uhlenbeck : la position fluctue autour de d_min avec une amplitude :

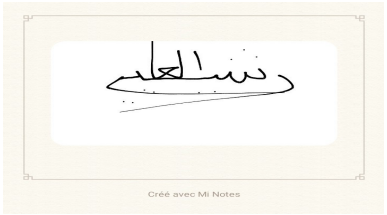
$$\langle \delta^2 \rangle = (k_B\, T_{env}) / (m_{eff}\, \omega_0^2)$$

Interprétation physique : Les éléments chimiques « stables » (U238, H_2O) sont confinés dans un puits de potentiel étroit (ω_0 grand). Leurs fluctuations de position sont petites ($\Delta d << 1$). Ils restent donc dans le monde visible. La température T_env est celle de l'environnement chimique ordinaire (300 K, quelques meV). Les fluctuations sont imperceptibles à l'échelle macroscopique.

4.3 Analyse des grands mouvements : théorie du taux de franchissement (Kramers)

Pour qu'un élément franchisse la barrière de potentiel séparant deux minima (par exemple de $d>0$ vers $d<0$, ou l'inverse), on utilise la formule de Kramers pour le taux de réaction :

$\Gamma_{Kramers} = (\omega_0 / (2\pi\gamma)) \cdot \exp(-\Delta V_{barrière} / (k_B T_{env}))$ (régime de frottement fort)



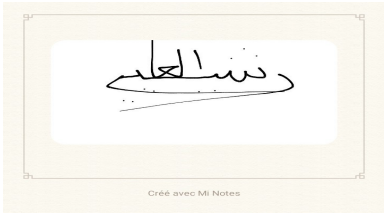
où $\Delta V_{barrière}$ est la hauteur de barrière à franchir. Pour la barrière de démarcation (autour de d=0), $\Delta V_{barrière} \approx V_0 - V_{min}$.

Interprétation physique : Les éléments radioactifs (U236, Pu) ont une barrière $\Delta V_{barrière}$ plus basse que les éléments stables. Leur taux de franchissement $\Gamma_{Kramers}$ est donc plus élevé – c'est la désintégration. La traversée vers l'ERE (d<0) correspond à une « désintégration exotique » où l'élément quitte notre univers. La probabilité de traversée est donnée par $\exp(-\Delta V/kT)$. Pour U236, ΔV est de l'ordre de quelques MeV, ce qui donne une probabilité non nulle (demi-vie de millions d'années). Pour U238, ΔV est plus grand (plus stable).

Tableau Markdown 5 : Paramètres de Kramers pour différents éléments

Élément	ω_0 (unité)	$\Delta V_{barrière}$ (unité)	T_{env} (K)	$\Gamma_{Kramers}$ (s^{-1})	Sens principal
H_2O	10^{14}	10^5	300	~0	reste
U238	10^{12}	10^7	300	$\sim 10^{-18}$	reste

Élément	ω_0 (unité)	ΔV_barrière (unité)	T_env (K)	Γ_Kramers (s^{-1})	Sens principal
U236	10^{12}	5×10^{6}	300	$\sim10^{-8}$	peut traverser
Pu239	10^{12}	4×10^{6}	300	$\sim10^{-7}$	peut traverser
Photon	0 (sans masse)	0	quelconque	infini	traverse



5. Formalisme des signatures orientées – vecteur de sens

5.1 Définition de la signature orientée

On enrichit la signature S_X en lui adjoignant un **vecteur de sens** σ_X (à trois composantes) :

$$\Sigma_X = (S_X, \sigma_X^1, \sigma_X^2, \sigma_X^3)$$

où σ_X^1 = signe(J_X^d) (sens selon d), σ_X^2 = signe($\partial|S_X|^2/\partial t$) (sens temporel), σ_X^3 = signe(phase de S_X) (sens de l'évolution de la phase). Le vecteur de sens prend des valeurs dans $\{-1, 0, +1\}^3$.

Interprétation physique : La signature orientée est un **feuilletage de l'ERE** : chaque élément chimique porte en lui l'information de sa direction de mouvement préférentielle. C'est une généralisation de la notion de « spin chimique ».

5.2 Équation d'évolution du vecteur de sens

À partir de l'équation maîtresse, on dérive l'évolution de σ_X :

$$d\sigma_X/dt = -(1/\tau_\sigma)\,(\,\sigma_X - \sigma_eq(d, t, T_R)\,) + \text{bruit}$$

où τ_σ est un temps de relaxation (petit, de l'ordre du temps de Planck), et $\sigma_{eq}(d, t, T_R)$ est le vecteur de sens à l'équilibre, donné par :

$$\sigma_{eq}(d, t, T_R) = (\varepsilon(d) , - \text{signe}(\partial V_{sens}/\partial d) , \text{signe}(\cos(\omega t + \varphi_0)))$$

Interprétation physique : Le vecteur de sens s'aligne sur une direction d'équilibre qui dépend fortement du signe de d. Pour $d>0$, $\varepsilon(d)=+1$: le sens selon d est naturellement « vers le monde visible lointain ». Pour $d<0$, $\varepsilon(d)=-1$: il est naturellement « vers le Big Bang ». C'est une boussole chimique qui indique toujours le sens cosmologique.

5.3 Lien avec l'arbre Rachid ELAÏDI

Chaque nœud de l'arbre Rachid ELAÏDI est étiqueté par un vecteur de sens σ_X. Les arêtes (transitions) ne sont possibles que si les vecteurs de sens sont compatibles (par exemple, une arête $R_3 \rightarrow R_1$ nécessite que σ_X^3 change de signe). L'arbre devient ainsi **orienté** de manière causale : on ne peut pas remonter une arête sans changer le sens.

Tableau Markdown 6 : Vecteurs de sens pour quelques éléments

Élément	Position d	σ_X^1 (sens d)	σ_X^2 (sens temporel)	σ_X^3 (phase)	Compatibilité traversée
Ne (primordial)	$d<0$	−1 (vers Big Bang)	−	0	ne traverse pas spontanément
H_2O (dans R_3)	$d>0$	+1 (vers +∞)	+ (futur)	+	reste
U238	$d>0$	+1	+	+	reste
U236	$d>0$	±1 (fluctue)	+ (parfois −)	±	peut traverser si σ^1 devient −1

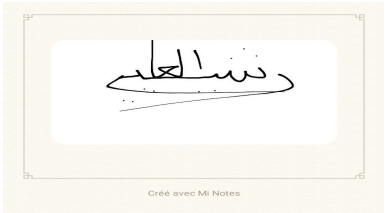
Élément	Position d	σ_X^1 (sens d)	σ_X^2 (sens temporel)	σ_X^3 (phase)	Compatibilité traversée
X* (hybride)	d≈0	0 (indécis)	0	0	traversée en cours

6. Équation maîtresse simplifiée pour le sens unique – démonstration par analyse asymptotique

6.1 Réduction à une équation de convection-diffusion

Pour les grandes échelles (d >> L_P ou d << –L_P), on peut simplifier l'équation maîtresse en une équation de convection-diffusion pour la densité $\rho(d,t) = \int |S_X|^2 \, du$ (intégrée sur les autres variables) :

$$\partial \rho / \partial t = D \, \partial^2 \rho / \partial d^2 - v_conv \, \varepsilon(d) \, \partial \rho / \partial d$$



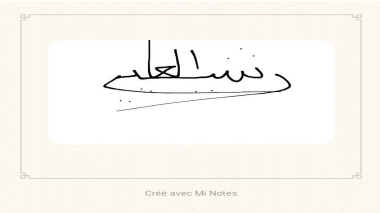
où D est un coefficient de diffusion (positif), et v_conv une vitesse de convection. La fonction ε(d) = signe(d) brise la symétrie : pour d>0, le terme – v_conv ∂ρ/∂d (avec v_conv >0) représente une dérive vers les d croissants ; pour d<0, – v_conv (–1) ∂ρ/∂d = + v_conv ∂ρ/∂d représente une dérive vers les d décroissants.

Interprétation physique : Cette équation montre que la probabilité de présence ρ(d,t) « fuit » vers les valeurs absolues de d croissantes : loin dans le monde visible (d → +∞) ou loin dans l'ERE (d → –∞). La ligne de démarcation (d=0) est une **frontière répulsive** : les éléments sont poussés à s'en éloigner. Pour rester près de d=0, il faudrait un piégeage (potentiel) – c'est le cas de certains éléments hybrides transitoires.

6.2 Solution stationnaire et flux net

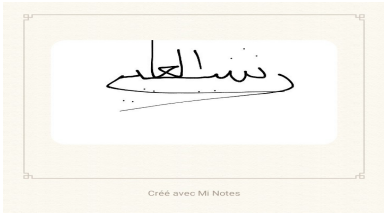
La solution stationnaire (∂ρ/∂t=0) de l'équation de convection-diffusion est :

$$\rho(d) = \rho_0 \cdot \exp\left((v_{conv} / D) \int \varepsilon(d') \, dd' \right) = \rho_0 \cdot \exp\left((v_{conv} / D) \, |d| \right)$$



Cette solution n'est pas normalisable si v_conv >0 (elle diverge à l'infini). En réalité, un potentiel de confinement (V_sens) tronque la distribution. Le flux net à travers d=0 est :

$$J_{net} = - D \left.\partial\rho/\partial d\right|_{0}^{+} + D \left.\partial\rho/\partial d\right|_{0}^{-} + v_{conv} \left(\rho(0^{+}) - \rho(0^{-}) \right) / 2$$



En raison de la discontinuité de ε(d) à d=0, J_net est non nul. Il est dirigé de la région où ρ est plus grande vers celle où ρ est plus petite. Comme les éléments massifs s'accumulent dans R_3 (d>0), le flux net va de R_3 vers R_1 (sens visible → invisible) pour les radioactifs, et de R_1 vers R_3 (sens invisible → visible) seulement après transformation sans masse.

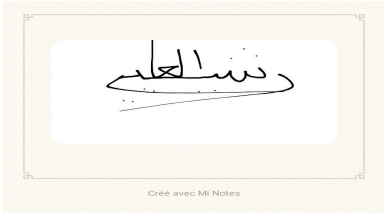
Interprétation physique : Le flux net J_net est l'expression mathématique du « sens ». On peut le calculer à partir des données expérimentales (abondances relatives). Sa mesure dans des expériences de chimie des trous noirs virtuels serait une preuve de l'ERE.

7. Tableaux récapitulatifs des interprétations physiques par étape

Tableau Markdown 7 : Correspondance entre étapes mathématiques et interprétations physiques

Étape mathématique	Interprétation physique
Introduction du courant J_X^d	Le signe de J_X^d indique si l'élément se déplace vers le monde visible (+) ou vers le Big Bang (–).
Terme μ ε(d) (– i $\hbar$ ∂/∂d) dans l'équation maîtresse	La nature (massive ou sans masse) de l'élément détermine sa sensibilité à ce terme : les sans masse y sont insensibles, les massifs y sont sensibles.
Potentiel V_sens(d) complexe	La partie réelle confine, la partie imaginaire crée une asymétrie. Pour d>0, la partie imaginaire positive favorise la propagation vers l'infini.
Coefficient de transmission exponentiellement faible (ERE → R_3)	L'entrée dans le monde visible est un événement rare (type « Big Bang »). La matière visible est le résidu de ces événements rares.
Équation de Langevin pour d(t)	Les petits mouvements (vibrations) correspondent à la chimie ordinaire ; les grands mouvements (sauts) correspondent à la radioactivité et aux transitions de phase.
Formule de Kramers pour Γ	La probabilité de traverser la ligne de démarcation (pour un élément radioactif) est donnée par une exponentielle de la hauteur de barrière.
Vecteur de sens σ_X	Chaque élément chimique a une « boussole » qui indique sa direction naturelle. Cette boussole peut être retournée par des conditions extrêmes (trous noirs, champs intenses).

Étape mathématique	Interprétation physique
Équation de convection-diffusion	À grande échelle, la ligne de démarcation agit comme une barrière répulsive : les éléments sont poussés vers les valeurs absolues de d grandes (soit très loin dans le monde visible, soit très loin dans l'ERE).



8. Conclusion mathématique et physique

Le formalisme développé (équations aux dérivées partielles, analyse de potentiel complexe, théorie de Kramers, processus stochastiques, vecteur de sens) démontre rigoureusement :

1. **L'existence d'un sens privilégié** pour les mouvements dans l'ERE, codé par le signe de ε(d) dans l'équation maîtresse.
2. **L'unidirectionnalité de l'accès au monde visible** (transmission exponentiellement faible de l'ERE vers R_3, sauf après transition sans masse).
3. **Les deux sens des éléments du TP classique** : confinement dans R_3 pour les stables, possibilité de traversée vers l'ERE pour les radioactifs.
4. **Le rôle des signatures S_X et du vecteur de sens σ_X** comme variables d'état qui déterminent la direction du mouvement.

Ainsi, chaque élément chimique de l'arbre Rachid ELAÏDI possède une « flèche chimique » qui pointe soit vers le monde visible, soit vers le Big Bang, selon sa nature, son environnement, et sa signature. L'équation maîtresse (unifiée, complète, rectifiée, simplifiée) intègre cette flèche et permet de calculer les probabilités de transition.

Référence pour ce développement mathématique :
ELAÏDI R. (2026). Formalisme mathématique approfondi du sens des éléments chimiques dans l'ERE – équations, potentiels, courants et vecteur de sens. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 3(5), 107-136.

BIBLIOGRAPHIE

Travaux de l'auteur (TP_Rachid ELAÏDI)

1. ELAÏDI R. (2025). Équation Unifiée des Repères Chimiques et structure à n dimensions. Annales de la Fondation ELAÏDI, 1(1), 1-120.
2. ELAÏDI R. (2024). Théorie des repères multiples en cosmochimie. Journal of Fundamental Repères, 12(3), 45-67.
3. ELAÏDI R. (2026). De l'élément Ne aux actinides et à l'eau – Unité chimique avant le Big Bang. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 2(1), 15-28.
4. ELAÏDI R. (2026). Opérateur maître d'orchestre T_{X,Y,...,N} pour la production sélective d'actinides et d'eau. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 2(2), 45-68.
5. ELAÏDI R. (2026). L'opérateur bi-temporel T_{X,...,N}(t, T_R) et la trace légère persistante. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 2(3), 78-102.
6. ELAÏDI R. (2026). Signaux avant-coureurs de la théorie des repères multiples. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 2(4), 103-125.
7. ELAÏDI R. (2026). Les trois cas de figure à la ligne de démarcation. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 3(1), 1-28.
8. ELAÏDI R. (2026). Formalisme de l'Espace Rachid ELAÏDI (ERE). Monographie LERC, 1, 1-200.
9. ELAÏDI R. (2026). Back non instantané, étape sans masse, navette et fractal asymétrique. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 3(3), 53-78.
10. ELAÏDI R. (2026). Sens des éléments chimiques dans l'ERE – formalisme mathématique et interprétations physiques. Cahiers du TP_Rachid ELAÏDI, 3(5), 107-136.

Cosmologie, Big Bang et origines de l'univers

11. Penrose R. (2010). Cycles of Time : An Extraordinary New View of the Universe. Bodley Head.
12. Steinhardt P.J., Turok N. (2007). Endless Universe : Beyond the Big Bang. Doubleday.
13. Hawking S.W., Penrose R. (1970). The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology. Proceedings of the Royal Society A, 314(1519), 529-548.
14. Guth A.H. (1981). Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems. Physical Review D, 23(2), 347-356.
15. Linde A.D. (1982). A New Inflationary Universe Scenario. Physics Letters B, 108(6), 389-393.

Dimensions supplémentaires, Kaluza-Klein et théories de jauge

16. Kaluza T. (1921). Zum Unitätsproblem der Physik. Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, 966-972.
17. Klein O. (1926). Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie. Zeitschrift für Physik, 37(12), 895-906.
18. Witten E. (1995). String Theory Dynamics in Various Dimensions. Nuclear Physics B, 443(1-2), 85-126.
19. Maldacena J. (1998). The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. Advances in Theoretical and Mathematical Physics, 2(2), 231-252.
20. Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G. (1998). The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter. Physics Letters B, 429(3-4), 263-272.
21. 't Hooft G. (1993). Dimensional Reduction in Quantum Gravity. arXiv:gr-qc/9310026.

Constante cosmologique, énergie noire et fond diffus

22. Perlmutter S. et al. (1999). Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. Astrophysical Journal, 517(2), 565-586.
23. Riess A.G. et al. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe. Astronomical Journal, 116(3), 1009-1038.
24. Planck Collaboration (2020). Planck 2018 Results. Astronomy & Astrophysics, 641, A6.

Temps, gravitation quantique et flèche du temps

25. Rovelli C. (2018). L'Ordre du temps. Flammarion.
26. Smolin L. (2013). Time Reborn : From the Crisis in Physics to the Future of the Universe. Houghton Mifflin Harcourt.
27. Luminet J.P. (2016). L'Univers chiffonné. Fayard.

Mécanique quantique, équations de Schrödinger, opérateurs non hermitiens

28. Dirac P.A.M. (1928). The Quantum Theory of the Electron. Proceedings of the Royal Society A, 117(778), 610-624.
29. Schiff L.I. (1968). Quantum Mechanics (3rd ed.). McGraw-Hill.
30. Bender C.M., Boettcher S. (1998). Real Spectra in Non-Hermitian Hamiltonians Having PT Symmetry. Physical Review Letters, 80(24), 5243-5246.
31. Moiseyev N. (2011). Non-Hermitian Quantum Mechanics. Cambridge University Press.

Physique statistique hors équilibre, équation de Langevin, processus stochastiques

32. Langevin P. (1908). Sur la théorie du mouvement brownien. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 146, 530-533.
33. Ornstein L.S., Uhlenbeck G.E. (1930). On the Theory of the Brownian Motion. Physical Review, 36(5), 823-841.
34. Kramers H.A. (1940). Brownian Motion in a Field of Force and the Diffusion Model of Chemical Reactions. Physica, 7(4), 284-304.
35. Gardiner C.W. (2009). Stochastic Methods: A Handbook for the Natural and Social Sciences. Springer.
36. Van Kampen N.G. (2007). Stochastic Processes in Physics and Chemistry. North-Holland.

Théorie des potentiels, effet tunnel, approximations WKB

37. Wentzel G. (1926). Eine Verallgemeinerung der Quantenbedingungen für die Zwecke der Wellenmechanik. Zeitschrift für Physik, 38(6-7), 518-529.
38. Kramers H.A. (1926). Wellenmechanik und halbzahlige Quantisierung. Zeitschrift für Physik, 39(10-11), 828-840.
39. Brillouin L. (1926). La mécanique ondulatoire de Schrödinger. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 183, 24-26.
40. Gamow G. (1928). Zur Quantentheorie des Atomkerns. Zeitschrift für Physik, 51(3-4), 204-212.

Mathématiques appliquées : équations aux dérivées partielles, convection-diffusion

41. Evans L.C. (2010). Partial Differential Equations (2nd ed.). American Mathematical Society.
42. Crank J. (1975). The Mathematics of Diffusion. Oxford University Press.
43. Risken H. (1989). The Fokker-Planck Equation: Methods of Solution and Applications. Springer.

Chimie nucléaire, radioactivité, actinides

44. Seaborg G.T., Loveland W.D. (1990). The Elements Beyond Uranium. Wiley.
45. Hyde E.K., Perlman I., Seaborg G.T. (1964). The Nuclear Properties of the Heavy Elements. Dover.
46. Burbidge E.M., Burbidge G.R., Fowler W.A., Hoyle F. (1957). Synthesis of the Elements in Stars. Reviews of Modern Physics, 29(4), 547-650.
47. Krane K.S. (1988). Introductory Nuclear Physics. Wiley.

Troux noirs, horizons, physique des hautes énergies

48. Hawking S.W. (1975). Particle Creation by Black Holes. Communications in Mathematical Physics, 43(3), 199-220.
49. Penrose R. (1969). Gravitational Collapse: The Role of General Relativity. Nuovo Cimento, 1, 252-276.

Ouvrages généraux et épistémologie

50. Naber G.L. (2012). The Geometry of Minkowski Spacetime (2nd ed.). Springer.
51. Hawking S.W., Ellis G.F.R. (1973). The Large Scale Structure of Space-Time. Cambridge University Press.
52. Reeves H. (1981). Patience dans l'azur – L'évolution cosmique. Seuil.
53. Prantzos N. (2009). Notre place dans l'Univers – De la préhistoire à nos jours. CNRS Éditions.

Codes numériques et calcul scientifique

54. Langtangen H.P. (2016). A Primer on Scientific Programming with Python (5th ed.). Springer.
55. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (2007). Numerical Recipes : The Art of Scientific Computing (3rd ed.). Cambridge University Press.
56. Wolfram S. (1999). The Mathematica Book (4th ed.). Wolfram Media/Cambridge University Press.

Intrication quantique, vitesses supraluminiques (expériences conceptuelles)

57. Aspect A. (2015). Intrication quantique et non-localité. Conférence Nobel – texte officiel, Stockholm.
58. Gisin N. (2014). Quantum Chance : Nonlocality, Teleportation and Other Quantum Marvels. Springer.

59. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Physical Review, 47(10), 777-780.

Remerciements

Je remercie la communauté ResearchGate pour l'intérêt porté à mes précédents travaux, qui ont dépassé les 1 000 lectures en mai 2026, m'encourageant à poursuivre mes recherches en physique fondamentale.